

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

**Řídicí a regulační procesy pro tvorbu směsi moderních
vznětových spalovacích motorů**

**The Control and Regulatory Processes for the Mixture
Production of Modern Diesel Engines**

Student:

Petr Belobrad

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Belobrad**
Studijní program: **B3943 Mechatronika**
Studijní obor: **3906R007 Automobilová elektronika**
Téma: **Řídicí a regulační procesy pro tvorbu směsi moderních vznětových spalovacích motorů**
The Control and Regulatory Processes for the Mixture Production of Modern Diesel Engines

Zásady pro vypracování:

1. Teoreticky rozeberte systém tvorby a podstatu poměru složení palivové směsi vznětového spalovacího motoru. Podrobně se zabývejte řídicími a regulačními procesy pro tvorbu směsi stejného typu motoru.
2. Dle instrukcí vedoucího bakalářské práce, s využitím dynamické válcové zkušebny, detailně ověřte teoretické předpoklady stanovené řešením bodu 1 a proveďte tak analýzu vlastností řízení vznětového motoru.
3. Dle pokynů vedoucího bakalářské práce vypracujte typizovanou laboratorní úlohu z oblasti řešené problematiky.

Seznam doporučené odborné literatury:


VLK, F.: Elektronické systémy motorových vozidel 1, 2. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2002, ISBN 80-238-7282-6
VLK, F.: Elektrická zařízení motorových vozidel. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2005, ISBN 80-239-3718-9
ŠTĚRBA, P.: Elektrotechnika a elektronika automobilů. Computer press, Praha, 2004
ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 str., ISBN 1-4018-4831-1
RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 str., ISBN 0-7506-7599-3
BOSCH technické brožury, žluté sešity 1996-2013

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Petr Noskiewič, CSc.
prorektor pro studium



Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 19.5 2014

Petr Belobrad

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5 2014



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Petr Belobrad

Adresa trvalého pobytu autora práce: Oborná 44, Bruntál 79201



Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D. za ochotu, odborné vedení a cenné rady po celou dobu zpracovávání práce. Dále bych také rád poděkoval doktorandům z katedry Elektroniky, Ing. Jiřímu Takáčovi a Ing. Tomáši Mrověcovi za ochotu a rady při zpracování této práce.

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je popsat a analyzovat procesy, které se podílejí na tvorbě směsi moderních vznětových motorů. V úvodní teoretické části je popsána historie a požadavky na moderní vznětové motory. Podrobněji jsou zde také popsány výpočty směsi a jednotlivé pracovní režimy, ve kterých motor pracuje. Hlavním tématem je praktická část. V té jsou uvedeny reálné naměřené hodnoty a průběhy při různých pracovních režimech motoru. Tyto průběhy a hodnoty jsou poté dále porovnávány s teoretickými předpoklady. V závěrečných měřeních je naměřena smíšená a kvalitativní regulace tvorby směsi. Všechna měření jsou zaměřena na ověření teoretických předpokladů pro tvorbu směsi při různých režimech práce moderního vznětového motoru.

Klíčová slova: Lambda regulace, tvorba směsi, regulace směsi, regulace výkonu vznětového motoru, vznětový motor

Abstract:

The effort of this thesis is to describe and analyze the processes that are involved in the formation of a mixture of modern diesel engines. The theoretical part describes the history and requirements of modern diesel engine. Here are described the calculations of mixtures and individual work mode in which the engine operates. The main issue is the practical part. Here are shown the real measured values and waveforms in various modes of the engine. These waveforms and values are compared with theoretical expectations. All measurements are focused on the verification of theoretical assumptions, the compounding the various schemes work of a modern diesel engine.

Keywords: Lambda regulation, formation of mixture, regulation of mixture, power control of diesel engine, diesel engine

Seznam použitých zkratk:

A	množství nasátého vzduchu v jednom válci
$(\alpha)_D$	požadovaný poměr vzduch/palivo
Da	naměřená hustota vzduchu
DP	tlakový rozdíl
ECT	snímač teploty chladící kapaliny
ECU	řídící jednotka motoru
EGR	recirkulace výfukových spalin
F	množství paliva v jednom válci
G	tíhové zrychlení
h	výška kapaliny
I_p	výstupní proud lambda sondy
m	hmotnost
M	molární hmotnost
MAF	snímač hmotnosti nasávaného vzduchu
MAP	snímač teploty nasávaného vzduchu
m_p	hmotnost paliva
m_{vz}	hmotnost vzduchu
M_{vz}	molární hmotnost vzduchu
n	látkové množství
N	počet válců
NTC	snímač teploty s negativním koeficient
n_v	objemová účinnost
p	tlak
p_1	tlak na konci komprese



p_2	tlak paliva v Railu
p_{vz}	tlak vzduchu v sacím kanálu
Q	průtokové množství
Q_t	průtok paliva vstřikovačem
r	plynová konstanta
r_1	otáčky motoru za sekundu
r_{vz}	plynová konstanta vzduchu
Re	hodnota EGR regulace
R_m	odpor měřících rezistorů
RPM	otáčky motoru
S	průřez
S_1	průřez vstřikovače
T	teplota
T_1	teplota vzduchu při vstupu do válce
T_b	základní doba vstřiku
T_c	teplota chladící kapaliny
T_s	skutečná délka vstřiku
U_v	výstupní napětí lambda sondy
V	objem
V	rychlost proudu kapaliny
v_1	rychlost proudu kapaliny ve válci
V_1	celkový objem válce
v_2	rychlost proudu kapaliny ve vstřikovači
V_k	kompresní objem jednoho válce
V_m	objem vstřikované nafty
V_z	zdvihový objem motoru
V_{z1}	zdvihový objem jednoho válce



ε	kompresní objem motoru
λ^*	aktuální součinitel přebytku vzduchu měřená lambda sondou
λ_m	součinitel přebytku vzduchu generovaný řídicí jednotkou
λ_p	stechiometrický poměr
λ_s	skutečný součinitel přebytku vzduchu
λ	vstupní součinitel přebytku vzduchu
ρ	hustota kapaliny
ρ_m	hustota nafty

Obsah:

1	ÚVOD	9
2	HISTORIE	10
3	URČENÍ SPRÁVNÉHO POMĚRU PALIVA A VZDUCHU	12
3.1	URČENÍ MNOŽSTVÍ VZDUCHU PŘIVEDENÉHO DO MOTORU	12
3.2	URČENÍ MNOŽSTVÍ PALIVA PŘIVEDENÉHO DO MOTORU	14
4	ELEKTRONICKÉ ŘÍZENÍ MOTORU	17
4.1	SNÍMAČE A AKČNÍ ČLENY	17
4.2	ŘÍDICÍ JEDNOTKA	18
4.3	VÝPOČTY PROVÁDĚNÉ ŘÍDICÍ JEDNOTKU MOTORU	18
5	PRACOVNÍ REŽIMY ŘÍZENÍ MOTORU	21
5.1	REŽIM STARTOVÁNÍ	21
5.2	REŽIM ZAHŘÍVÁNÍ MOTORU	21
5.3	REŽIM ŘÍZENÍ V OTEVŘENÉ SMYČCE	22
5.4	REŽIM ŘÍZENÍ V UZAVŘENÉ SMYČCE	23
6	MĚŘENÍ NA VOZIDLE	24
6.1	ANALÝZA VSTŘIKOVACÍ DÁVKY PRO START MOTORU	24
6.2	ANALÝZA Vlivu TEPLoty NASÁVANÉHO VZDUCHU PŘI TVORBĚ STARTOVACÍ DÁVKY	27
6.3	ANALÝZA Vlivu TEPLoty PALIVA NA TVORBU SMĚSI	30
6.4	ANALÝZA SOUČASNÉHO Vlivu VŠECH TEPLot OVLIVŇUJÍCÍ TVORBU SMĚSI PŘI STARTOVÁNÍ.....	32
6.5	Vliv JEDNOTLIVÝCH TEPLot NA TVORBU SMĚSI PŘI FÁZI STARTOVÁNÍ MOTORU.....	35
6.6	ANALÝZA SMĚSI VE FÁZI ZAHŘÍVÁNÍ MOTORU.....	36
6.7	ANALÝZA SMĚSI VE FÁZI PRÁCE V UZAVŘENÉ SMYČCE PŘEPLŇOVANÉHO MOTORU	38
6.8	ANALÝZA SMĚSI VE FÁZI PRÁCE V OTEVŘENÉ SMYČCE NEPŘEPLŇOVANÉHO MOTORU	41
6.9	ANALÝZA HODNOT LAMBDA :	44
7	ZÁVĚR	48
8	LITERATURA	49
9	SEZNAM PŘÍLOH.....	50

1 Úvod

Tvorba směsi pro spalovací motor je jedním z nejdůležitějších procesů, které probíhají v rámci chodu motoru. Už od vynalezení dieselového motoru se konstruktéři snaží, aby byla směs v motoru v ideálním poměru vzhledem ke stavu, ve kterém se motor právě nachází. Poměr palivo - vzduch by měl být v určitém ideálním stavu, protože je to parametr, který má rozhodující vliv na vlastnosti a chování motoru. Ovlivňuje spotřebu paliva, emise výfukových plynů, výkon, točivý moment a také životnost motoru.

Směs se u dieselového motoru vytváří až přímo ve válci motoru a to vstříknutím paliva do spalovacího prostoru. Klasické nepřepřlňované motory nemají ve většině případů žádnou regulaci množství vzduchu (vyjma zpětné klapky v sání za účelem hladkého průběhu zastavení chodu motoru), které je přivedeno do spalovacího motoru. To znamená, že poměr paliva a vzduchu je možné vytvořit pouze přesným dávkováním paliva. Jedná se o tzv. kvalitativní řízení motoru, což jinými slovy znamená, že motor je řízen změnou kvality směsi. Zjednodušeně lze pro případ konstantních otáček motoru říci, že dochází k nasávání konstantního množství vzduchu a upravuje se jenom množství paliva.

Směs je nutné neustále upravovat, protože stavy, ve kterých se motor nachází se dynamicky mění. Dieselový motor vyžaduje jinou směs při akceleraci, deceleraci nebo volnoběhu. Všechny tyto stavy musí elektronický systém řízení motoru rozpoznat a následně upravit směs, aby bylo dosaženo kompromisně nejlepšího možného chování motoru v těchto stavech.

2 Historie

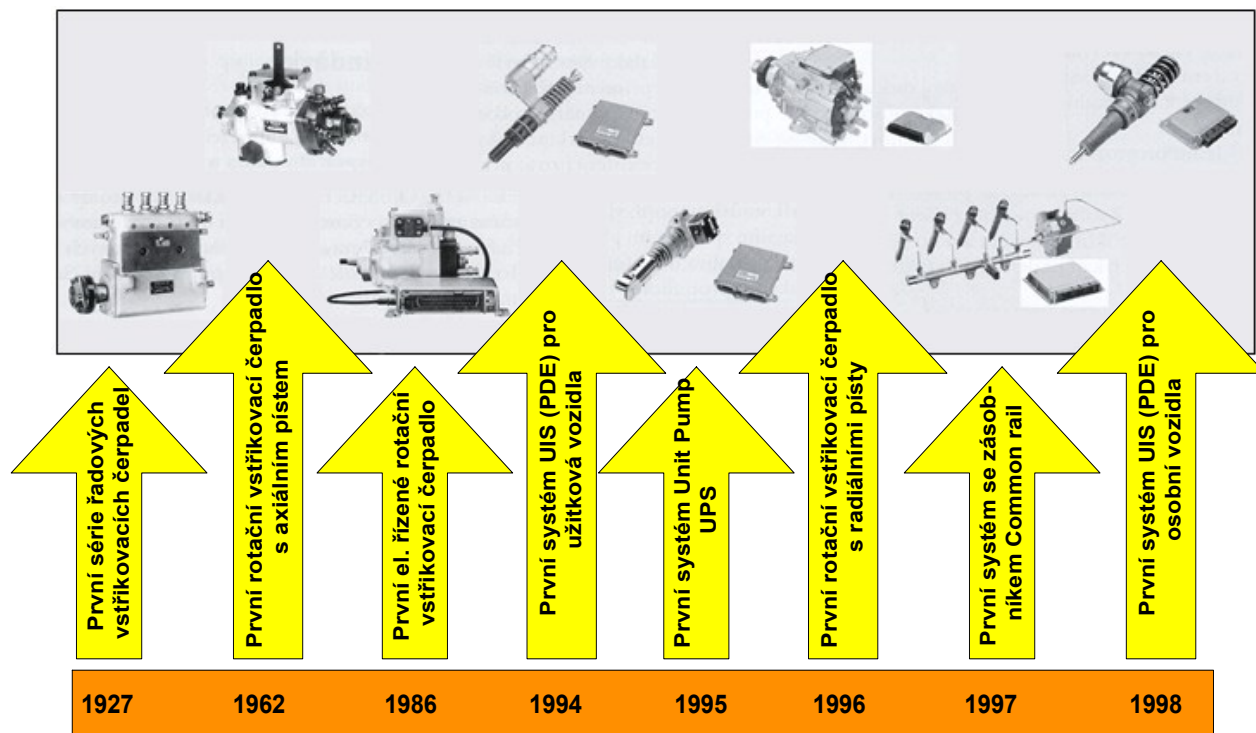
První dieselové motory se pro pohon automobilů moc nevyužívaly, problém byl v jejich vysoké hmotnosti, hlučnosti a malém rozsahu otáček. Proto se spíše využívaly jako motory generátorů nebo stacionární motory pro pohon pracovních strojů. Až začátkem 20.století, vlivem zlepšení přesnosti výroby a zájmu větších firem, došlo ke zlepšení vlastností motorů na takovou úroveň, že bylo možné motor použít do automobilu. V roce 1926 firma Bosch začala se sériovou výrobou řadového vstřikovacího čerpadla, které se využívalo pouze pro nákladní vozy. Motory se vyznačovaly vysokým kroutícím momentem, takže jejich využití pro nákladní vozy bylo výhodné. Až roku 1936 vzniknul první sériově vyráběný dieselový osobní automobil. Představila ho automobilka Mercedes-Benz pod modelovým označením 260D.

Od 30.let až do 60. let 20.století se dieselový motor dále vyvíjel, ale nebyla v jeho konstrukci a řízení provedena téměř žádná revoluční změna. To bylo způsobeno tím, že motor splňoval požadavky tehdejšího trhu a žádná z automobilek nechtěla do vývoje motoru pro osobní automobil investovat peníze. Motor byl relativně spolehlivý, spotřeba paliva nebyla důležitým parametrem a žádný z tehdejších předpisů nepřikazoval emisní limity výfukových plynů motoru. Automobilky se spíše soustředily na zlepšování konkurenčního, v té době mnohem lepšího, motoru benzínového.

Až koncem 80.let 20.století vlivem zájmu zákazníků o spotřebu paliva a zavedením emisních norem se začalo s prudkým vývojem motoru a nasazováním dieselového motoru do osobních automobilů. Markantní rozmach v této době nastal i v oblasti polovodičové a počítačové techniky. Technologie řízení motoru pomocí řídicí jednotky umožnila měřit a rychle vyhodnocovat veličiny, které motor potřebuje pro svou činnost. Například přesné měření hmotnosti vzduchu nebo přesné odměření vstřikované dávky paliva. Na přelomu 21. století byly vyvinuty nové vstřikovací systémy PD a poté Common rail. Tyto systémy vstřikují palivo do válce pod velmi vysokým tlakem, což výrazně zvětšilo výkon a kroutící moment motoru a zlepšilo také spotřebu paliva a emisní hodnoty výfukových plynů.

Nasazením elektronických komponentů, které nahradily starší, pomalé mechanické vazby v řízení motoru, se stal motor ekonomický, méně hlučný a výkonný. Z těchto důvodů činí dnes podíl dieselových osobních automobilů 54% celkové produkce

automobilek. U některých automobilek , například Audi nebo BMW , je to až 70% celkové produkce. Což svědčí o stále větší oblíbenosti diesellového motoru. [6]



Obr č.1 Vývoj vstřikovacích systému [3]

3 Určení správného poměru paliva a vzduchu

Při řízení činnosti motoru a řízení činnosti tvorby směsi se vychází ze Stechiometrického poměru. Tento poměr určuje množství paliva a vzduchu tak, aby směs dobře prohořela. Tento poměr se označuje jako λ a vypočítá se následovně:

$$\lambda = \frac{m_{vz}}{m_p} \quad (3.1)$$

LEGENDA

m_{vz} hmotnost vzduchu [kg]

m_p hmotnost paliva [kg]

Pro spalování nafty je definován ideální stochiometrický poměr odpovídající poměru palivo/vzduch 14,5. To znamená, že na dokonalé zhoření 1 kg paliva je nutné 14,5 kg vzduchu. Diesellové nepřepřlňované motory ale pracují, jak už bylo výše uvedeno, s kvalitativním řízením. Tudíž je vždy (vyjma velkého zatížení) přiváděno do směsi více vzduchu než paliva a směs je tzv. chudá, poměr lambda má hodnotu vyšší než 1.

3.1 Určení množství vzduchu přivedeného do motoru

Diesellové motory pracují s dvěma typy regulace tvorby směsi. Prvním typem je smíšená regulace. Tato regulace se využívá u motoru vybavených turbodmychadlem nebo kompresorem. V případě, že je motor vybaven turbodmychadlem, lze regulovat množství vzduchu, které se přivádí do spalovacího prostoru. Ovládání výkonu a kroutícího momentu se provádí pomocí vstřikovací dávky a také pomocí množství vzduchu.

Druhým typem regulace je kvalitativní. S tímto typem regulace pracují motory bez turbodmychadla nebo kompresoru. Není zde regulováno množství vzduchu. Při konstantních otáčkách motoru dochází k nasávání konstantního množství vzduchu a změna výkonu a kroutícího momentu se tedy provádí pouze změnou vstřikovací dávky.

Množství vzduchu je parametr, který by měl být určen s vysokou přesností. Níže uvedený postup je pro motor bez turbodmychadla. I tak bude určení množství vzduchu poměrně složité a pro výpočet bude zapotřebí určitých zjednodušení.

Bude vycházeno ze stavové rovnice plynu:

$$p.V = n.r.T \quad (3.2)$$

LEGENDA

p	tlak [Pa]
V	objem [m ³]
n	látkové množství [mol]
r	plynová konstanta [J.kg.K ⁻¹]
T	teplota [K]

Dosazením za látkové množství dostaneme vztah:

$$p.V = \frac{m}{M}.r.T \quad (3.3)$$

LEGENDA

m	hmotnost [g]
M	molární hmotnost [g/mol]
p	tlak vzduchu v sacím kanálu [Pa]
V	celkový objem [m ³]
T	teplota [K]

Vyjádřením požadované veličiny hmotnosti dostaneme vztah:

$$m = \frac{p.V.M}{r.T} \quad (3.4)$$

Aplikací tohoto vztahu na spalovací motor získáme vztah:

$$m_{vz} = \frac{p_{vz}.V_1.M_{vz}}{r_{vz}.T_1} \quad (3.5)$$

LEGENDA

m_{vz}	hmotnost vzduchu [kg]
p_{vz}	tlak vzduchu v sacím kanálu [Pa]
M_{vz}	molární hmotnost vzduchu [28,96 g/mol]
r_{vz}	plynová konstanta vzduchu [287,1 J.kg.K ⁻¹]
T_1	teplota vzduchu při vstupu do válce [70° C→343,15K]
V_1	celkový objem válce [m ³]

Jako poslední chybí dopočítat celkový objem jednoho válce motoru:

$$V_{z1} = \frac{V_z}{i} \quad (3.6)$$

$$V_k = \frac{V_{z1}}{\varepsilon - 1} \quad (3.7)$$

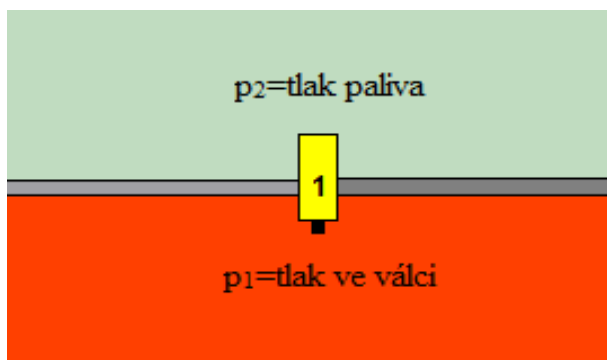
$$V_1 = V_k + V_{z1} \quad (3.8)$$

LEGENDA

V_{z1}	zdvihový objem jednoho válce [m ³]
V_z	zdvihový objem motoru [m ³]
V_k	kompresní objem jednoho válce [m ³]
ε	kompresní objem motoru
i	počet válců motoru

3.2 Určení množství paliva přivedeného do motoru

Druhým prvkem pro tvorbu směsi je palivo. Směs se na rozdíl od benzínových motorů utváří až přímo ve válci motoru a to za velmi krátký čas. Princip vznětového motoru spočívá v tom, že je nafta do válce motoru vstřikována až na konci komprese. To znamená, že tlak paliva ve vstřikovači musí být vyšší než tlak na konci komprese.



Obrázek č.2 Schéma vstřiku paliva

LEGENDA

- 1 vstřikovací tryska
- p_1 tlak na konci komprese (60 bar)
- p_2 tlak paliva v Railu (cca 240-300 bar)

Výše zobrazená situace lze popsat pomocí zákona zachování objemu:

$$Q = S \cdot v \tag{3.9}$$

LEGENDA

- Q průtokové množství [kg/s]
- S průřez [mm²]
- v rychlost proudu kapaliny [m/s]

Jelikož průřez vstřikovače je pouze konstrukčním parametrem, jedinou neznámou v tomto vzorci je rychlost proudu kapaliny. Pro její určení bude vycházeno z Bernuliho rovnice.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + G \cdot h = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + G \cdot h \tag{3.10}$$

LEGENDA

ρ	hustota kapaliny [kg/cm^3]
v_1	rychlost proudu kapaliny ve válci [m/s]
G	tíhové zrychlení [m/s^2]
h	výška kapaliny [m]
v_2	rychlost proudu kapaliny ve vstřikovači [m/s]

V této rovnici lze zanedbat výšku kapaliny, protože rozdíl výšek ve vstřikovači je velmi malý. Dále lze v této rovnici zanedbat rychlost v_1 a to z důvodu velkých nepoměrů průřezů S_1 (průřez vstřikovače) a S_2 (průřez za vstřikovačem).

Po této úpravě dostaneme následující vztah:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} \quad (3.11)$$

Tento vztah již lze úpravou dostat vztah pro rychlost v_2 :

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{p_2 - p_1}{\rho} \right)} \quad (3.12)$$

Dosazením do zákona zachování hmotnosti dostaneme konečný vztah pro určení průtokového množství kapaliny:

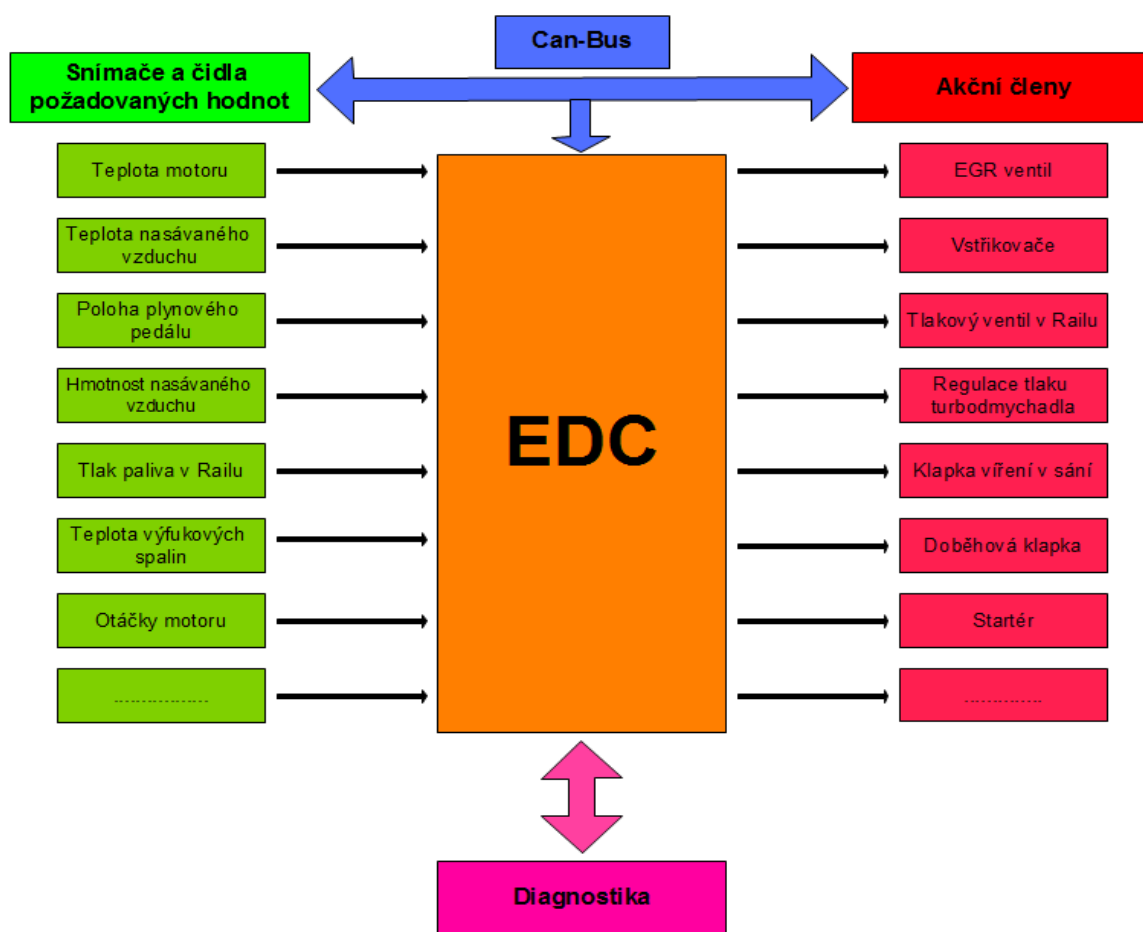
$$Q = S_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{p_2 - p_1}{\rho}} \quad (3.13)$$

LEGENDA

S_1	průřez vstřikovače [mm^2]
-------	--------------------------------------

4 Elektronické řízení motoru

Principem řízení moderních motorů je elektronická regulace tvorby směsi. Na této regulaci se podílejí tři skupiny prvků, kterými jsou snímače, řídicí jednotka a akční členy. Tyto komponenty jsou navzájem propojeny pomocí komunikační sběrnice (nejčastěji Can-bus). Regulace tvorby směsi probíhá ve dvou regulačních smyčkách, otevřených a uzavřených. Zavedením těchto regulačních smyček do procesu řízení tvorby směsi dieselových motorů se výrazně vylepšily vlastnosti těchto motorů, jako například spotřeba paliva, emise výfukových plynů, hlučnost, atd.



Obrázek č.3: Blokové schéma řízení motoru

4.1 Snímače a akční členy

V ovládání motoru plní snímače a akční členy nenahraditelnou funkci. Jejich úkol je převádět fyzikální veličiny na elektrické signály a naopak. Tento proces je nezbytný z důvodu informování řídicí jednotky o stavu v jakém se vozidlo nachází. Tyto stavy musí řídicí jednotka rozpoznat a vhodně na ně reagovat.

Snímače a akční členy mají klíčovou roli při posuzování kvality a rychlosti regulačního procesu v každém jízdním režimu. Při návrhu a konstrukci regulačního systému se ne vždy používají snímače nejvyšší kvality s nejmodernější technologií. Důvodem je jejich cena a také rychlost snímání dané veličiny. Většinou se jedná o kompromis mezi cenou a požadovanými vlastnostmi, protože nejpresnější a nejrychlejší snímače mají nesrovnatelně vyšší cenu, která by se projevila v ceně vozu. Jejich o řád vyšší cena se ale neprojeví v jejich o řád větší kvalitě regulačního procesu.

4.2 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka motoru přijímá informace ze snímačů. Signály ze snímačů zpracovává a vyhodnocuje mikrokontroler. Po vyhodnocení všech potřebných informací, zasahuje řídicí jednotka motoru do tvorby směsi přes akční členy. Řídicí jednotka je prostředníkem mezi snímači a akčními členy.

Na vstupní části řídicí jednotky se nacházejí zesilovače a filtry. Úkolem zesilovačů a filtrů je odfiltrovat případné šумы a zesílit vstupní signály přicházející do řídicí jednotky, aby řídicí jednotka nedostávala zkreslené informace. Výstupem některých snímačů je ale analogový signál např. snímač tlaku. Z tohoto důvodu musí vstupní část obsahovat také A/D převodníky, které převedou analogový signál na digitální, s kterým je schopna mikroprocesorová technika pracovat.

Dalším krokem je vyhodnocení. Vyhodnocení provádí mikrokontroler s naprogramovaným procesem řízení motoru a pamětí ROM. Po vyhodnocení informací jsou výstupní signály dále přivedeny na koncový stupeň. Ten má za úkol zesílit výstupní signály na patřičnou úroveň, aby jimi mohly být ovládány akční členy.

4.3 Výpočty prováděné řídicí jednotkou motoru

Výrobci ECU motoru programují a vyrábí řídicí jednotky v určitých specifikacích, které vždy patří k „know how“ daného výrobce. Různé řídicí jednotky nepoužívají vždy stejný algoritmus pro zpracování a vyhodnocování měřených veličin. Postupy výpočtu se liší v závislosti počtu proměnných, které vstupují do řídicí jednotky. Například jiný postup výpočtu nastává, když je motor vybaven snímačem hmotnosti vzduchu a jiný zase, když je

motor bez tohoto snímače a hmotnost vzduchu je určována nepřímo přes jiné snímače (například snímače teploty a tlaku vzduchu). Níže uvedený postup je obecný a tvoří základ pro určení tvorby směsi v každé řídicí jednotce motoru.

Jako první je určeno množství vzduchu v sání při daných otáčkách motoru:

$$MAF = \rho_{vz} \left[\left(\frac{RPM}{60} \right) \left(\frac{V_z}{2} \right) * nv - Re \right] \quad (4.1)$$

LEGENDA

ρ_{vz}	hustota vzduchu (1,1845[kg/m ³ při 20 °C a tlaku 1,01325 bar])
RPM	otáčky motoru za minutu
Nv	objemová účinnost
Re	hodnota EGR regulace

Jako další následuje určení množství vzduchu v jednom válci:

$$A = \frac{MAF}{r_1 * (N / 2) * (\alpha)_D} \quad (4.2)$$

LEGENDA

MAF	aktuální hmotnost průtoku vzduchu v sání
r_1	otáčky motoru za sekundu $r_1 = \frac{RPM}{60}$
N	počet válců
$(\alpha)_D$	požadovaný poměr vzduch/palivo

Dále je určeno množství paliva:

$$F = \frac{A}{(\alpha)_D} \quad (4.3)$$

LEGENDA

- A množství vzduchu v jednom válci [kg]
F požadované vstříknuté množství paliva [kg]
(α)_D požadovaný poměr vzduch/palivo

Jako poslední je nutné zkorigovat potřebné množství paliva s průtokem vstřikovače a určit potřebnou dobu otevření vstřikovače:

$$T_s = \frac{F}{Q_t} \quad (4.4)$$

LEGENDA

- Q_t průtok paliva vstřikovačem [kg/s]

V tabulce číslo 1. jsou uvedeny vstřikovací dávky v závislosti na době otevření vstřikovače při různých provozních režimech motoru.

	Plná zátěž	Střední zátěž	Volnoběh
Tlak v Railu [bar]	1600	600	300
Otáčky/minutu	1000	450	450
Délka otevření [μ s]	800	630	640
Vstřikovací dávka [mg]	57,4 \pm 6,9	14,8 \pm 4,8	4,6 \pm 3,5

Tabulka č.1: Závislost vstřikovací dávky na době otevření vstřikovače [3]

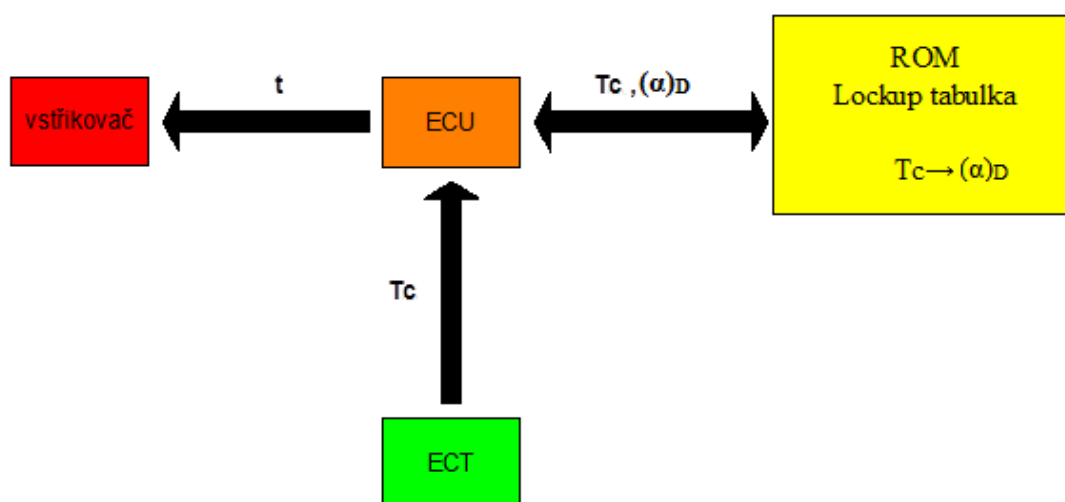
5 Pracovní režimy řízení motoru

5.1 Režim startování

Startovací poměr vzduch/palivo je určen z teploty chladící kapaliny. Při nízkých teplotách utváří rozprášené palivo ve válci větší kapky. Větší kapky mají nižší aktivní plochu pro hoření (nacházející se na povrchu kapek). Z tohoto důvodu je nutné, aby se při nižších teplotách snížil poměr vzduch/palivo. Jediným požadavkem v tomto režimu je co nejoptimálnější nastartování motoru, a proto řidič do tohoto režimu řízení motoru nezasahuje. Poloha plynového pedálu nemá vliv na tvorbu směsi. Po nastartování motoru se režim startování ukončí a začíná režim zahřívání motoru. [1]

5.2 Režim zahřívání motoru

Požadavkem v tomto režimu je co nejrychlejší zahřátí motoru na provozní teplotu. Hlavní proměnnou pro určení ideálního poměru vzduch/palivo je teplota chladící kapaliny. Nezohledňují se stále emise motoru ani spotřeba paliva. Správná hodnota poměru vzduch/palivo se určuje pouze z teploty chladící kapaliny. Výstupní signál ze snímače teploty chladící kapaliny (ECT), tedy teplota, je přivedena na určenou adresu řídicí jednotky motoru (ECU). Zde je hodnotě aktuální teploty chladící kapaliny pomocí lookup tabulky přidělena hodnota poměru vzduch/palivo. Po určité době dané časováním ECU, probíhá znovu načtení hodnoty teploty a určení ideálního poměru. [1]

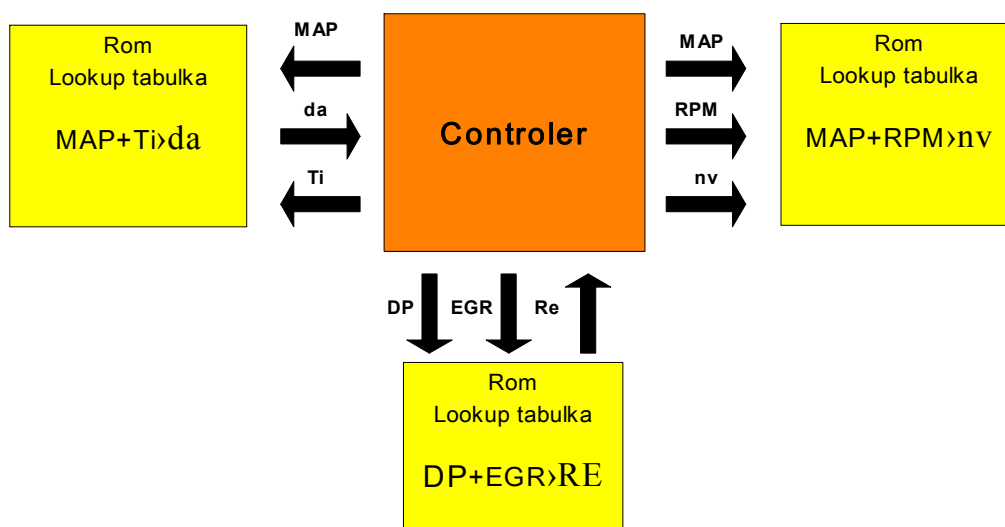


Obrázek č.3: Schéma zahřívání motoru [1]

5.3 Režim řízení v otevřené smyčce

Po zahřátí motoru na provozní teplotu ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$) přechází ECU do režimu otevřené smyčky. V tomto režimu je požadavek na co nejmenší emisní hodnoty motoru. Délka pulzu otevření vstřikovače T_s je vypočítána ze základního vzorce tak, aby byla hodnota stechiometrického poměru v požadované hodnotě. Tato výsledná délka vstřiku může být ještě dále korigována, např. v důsledku poklesu palubního napětí. Metodou Speed-density se vypočítává poměr vzduch/palivo z tlaku v sacím potrubí, otáček motoru a z teploty nasávaného vzduchu. Hustota vzduchu se zjistí z MAP senzoru, teploty nasávaného vzduchu, objemového průtoku v kombinaci s EGR regulací (z aktuálních otáček motoru) a objemové účinnosti. Konečný průtok vzduchu se vypočítá jako součin rychlosti průtoku vzduchu a hustoty vzduchu. Tato metoda byla výrobci u moderních automobilů nahrazena použitím MAF senzoru.

Při použití MAF senzoru se většina potřebných veličin získává buďto z jiných snímačů nebo z lookup tabulek. Jak je znázorněno na obr. 4. Pro určení hodnoty je nutné znát tři proměnné a to objemovou účinnost (η_v), hustotu vzduchu (ρ_{vz}), hodnotu EGR regulace (RE). Dále je zde znázorněno, jaké veličiny je potřebné znát pro jejich určení. [1]



Obrázek č.4: Schéma otevřené smyčky [1]

5.4 Režim řízení v uzavřené smyčce

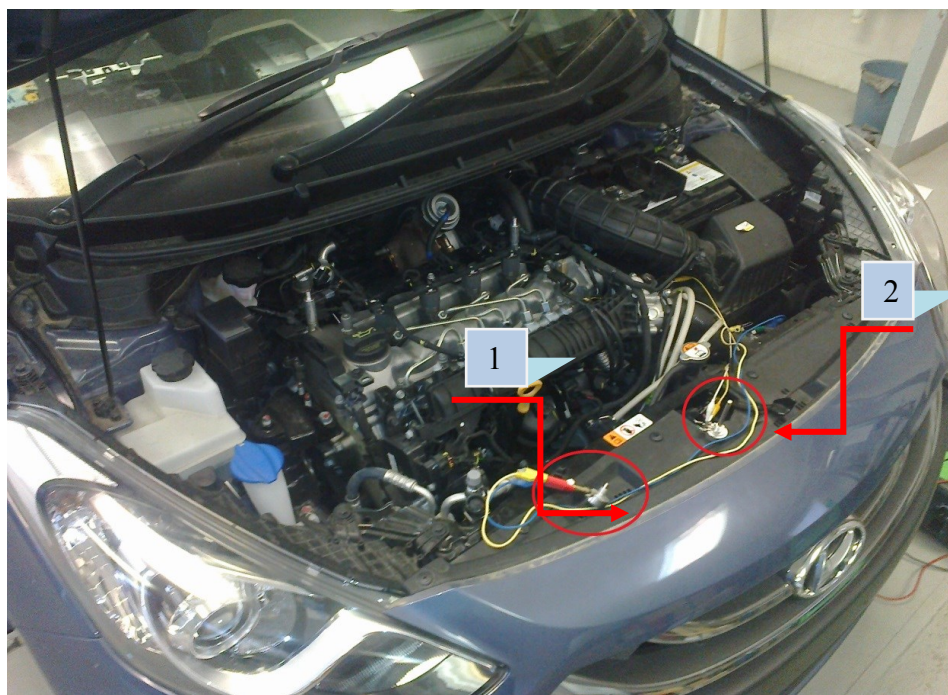
Nejpřesnější nastavení délky vstřiku nastává v režimu práce v uzavřené smyčce. V režimu práce v uzavřené smyčce se měří výstupní proměnná, která je pak pomocí zpětné vazby předána ECU (regulátoru). Ta tuto hodnotu porovná s ideální (požadovanou) a na základě odchylky vytvoří signál, který má účel eliminovat rozdíl mezi skutečnou a požadovanou hodnotou. Nejlépe na nulu. Toto řízení je velice přesné z důvodu použití zpětné vazby. Zpětná vazba umožňuje korigovat chyby, které by za normálních okolností ovlivnily daný systém. Typickým příkladem je regulace volnoběžných otáček motoru. ECU nastavuje volnoběžné otáčky motoru, které jsou následně měřeny snímačem otáček klikové hřídele. V případě, že se výstupní otáčky motoru neshodují s nastavenými (například z důvodu opotřebení motoru) ECU je o tom informována a prodlouží délku vstřiku paliva (T_s), čímž dojde ke zvýšení otáček motoru. [1]

6 Měření na vozidle

6.1 Analýza vstřikovací dávky pro start motoru

Měření mělo za cíl určit vstřikovací dávku paliva do válce ve fázi startu motoru při různých teplotách. Měření proběhlo na automobilu Hyundai i30 1.6 CRDi r.v. 03/2012 označení motoru D4FB.

První předpoklad pro měření bylo uvést vozidlo do takového stavu, aby bylo možné simulovat různé teploty chladicí kapaliny a teploty nasávaného vzduchu. Oba snímače teplot jsou NTC odporové snímače, a tak byly nahrazeny proměnnými rezistory (potenciometry). Pouze snímač teploty paliva nebyl nahrazen a teplota paliva byla po celou dobu měření na teplotě cca 21 °C.



Obrázek č.4: Nahrazení snímačů teploty

Popis obrázku:

- 1) Potenciometr teploty chladicí kapaliny,
- 2) Potenciometr teploty nasávaného vzduchu.

Zjištění nastavených teplot probíhalo pomocí diagnostiky Bosch KTS, kde byly vybrány skutečné hodnoty. Dále zde byly zobrazeny skutečné hodnoty vstřikovací dávky a množství nasátého vzduchu ve válci.

Pro první měření byly nasimulovány teploty nasávaného vzduchu a teploty chladicí kapaliny na 20,6 °C



Obrázek č.5: Skutečné hodnoty pro teplotu 20,6 °C.

V čase 32,4 s byla zahájena startovací dávka pro start motoru. V tomto čase byly odečteny aktuální hodnoty vstřikovací dávky a množství nasátého vzduchu ve válci.

Příklad výpočtu:

Převodění vstřikovací dávky na dm^3 : $24,7 \text{ mm}^3 = 24,7 \cdot 10^{-6} \text{ dm}^3$

Výpočet hmotnosti vstřik. paliva: $m = \rho_m \cdot V_m = 0,86 \cdot 24,7 \cdot 10^{-6} = 2,1242 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$ (6.1)

Hustota nafty při 20°C $\rho_m = 0,86 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$

Převedení množství vzduchu na kg: $616,7 \text{ mg} = 616,7 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$

$$\text{Výpočet stech. poměru : } \lambda_p = \frac{m_{\text{vz}}}{m_p} = \frac{616,7 \cdot 10^{-6}}{2,1242 \cdot 10^{-5}} = 29,032 \quad (6.2)$$

$$\text{Porovnání s } \lambda (14,5) \text{ ideální: } \lambda = \frac{29,032}{14,5} = 2,002$$

Teplota nasávaného vzduchu [°C]	20,6
Teplota chladicí kapaliny [°C]	20,6
Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	616,7
Vstřikovací dávka [mm ³]	24,7
Stechiometrický poměr	29,032
λ	2,002

Tabulka č.2: Příklad naměřených, vypočítaných hodnot pro teplotu 20,6 °C

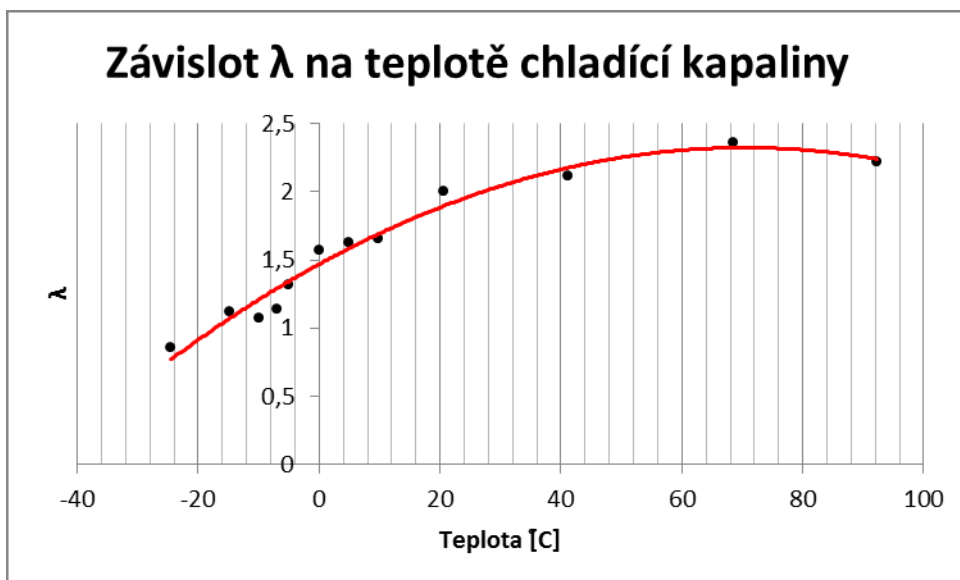
Z výpočtů pro teplotu 20,6 °C plyne, že startovací směs ve válci je chudá.

Stejným způsobem byly dopočítány ostatní Stechiometrické poměry a součinitele přebytku vzduchu λ v různých simulovaných teplotách v rozmezí -24,5 °C až 92,2 °C.

Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce číslo 3.

Teplota nasávaného vzduchu [°C]	Teplota chladicí kapaliny [°C]	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mm ³]	Stechiometrický poměr	λ
-9	-24,5	424	39,2	12,57	0,86
-8	-14,7	334	23,9	16,24	1,121
-8	-10	462,5	34,5	15,588	1,071
-6,9	-6,9	462,5	32,9	16,54	1,14
-5	-5	526,7	32,2	19,01	1,317
0	0	616,7	31,4	22,83	1,575
4,9	4,9	571,9	28,2	23,581	1,663
9,8	9,8	591	28,6	24,028	1,657
20,6	20,6	616,7	24,7	29,032	2,002
25,5	41,2	563,3	21,2	30,89	2,13
25,5	68,6	668	22,7	34,21	2,26
25,5	92,2	629,5	22,7	32,245	2,223

Tabulka č.3: Naměřené a vypočítané hodnoty



Graf č.1: Vliv teploty na tvorbu směsi

Účelem tohoto měření bylo analyzovat směs ve válci při startování motoru. Při startování motoru musí být směs nastavena, aby byl zabezpečen optimální start motoru. Určení ideálního součinitele λ pro různé teploty při startu motoru určuje výrobce motoru. Je dán více parametry jako například kompresním poměrem motoru nebo vstřikovacím tlakem paliva.

Proměnným parametrem je však teplota směsi, která se za různých klimatických podmínek mění. Z grafu číslo 1. vyplývá, že se zvyšující teplotou chladící kapaliny a se zvyšující teplotou nasávaného vzduchu se zvyšuje součinitel λ . To, že se zvyšuje součinitel λ znamená, že je směs ve válci chudší (více vzduchu než paliva). Snížení součinitele λ je způsobené nižší hořlavostí paliva při nízkých teplotách. Proto je nutné, aby bylo ve směsi s nižší teplotou více paliva a tím se docílilo vyšší účinnosti hoření při startu motoru.

6.2 Analýza vlivu teploty nasávaného vzduchu při tvorbě startovací dávky

Další proměnnou určující celkový poměr směsi ve válci je teplota nasávaného vzduchu. Při tvorbě směsi se do válce dostává vzduch z okolí s určitou teplotou, která ovlivňuje teplotu celé směsi. Při startu motoru je teplota ve válci a teplota celé směsi jedinou proměnnou, podle které se určuje vstřikovací dávka paliva a tím i stechiometrický

poměr. Pro přesné určení teploty nasávaného vzduchu je nutné, aby byl snímač této teploty umístěn co nejbližší spalovacího prostoru. Tím se docílí co nejpřesnější měření teploty.

Toto měření určuje důležitost teploty nasávaného vzduchu při tvorbě směsi při fázi startování motoru. Měření proběhlo na automobilu Hyundai i30 1.6 CRDi r.v. 03/2012 označení motoru D4FB.

Předpokladem pro měření na vozidle bylo uvést vozidlo do měřicích podmínek:

- teplota chladicí kapaliny cca 90 °C,
- teplota paliva 21 °C,
- různé teploty nasávaného vzduchu v rozmezí -40 °C až 35 °C.

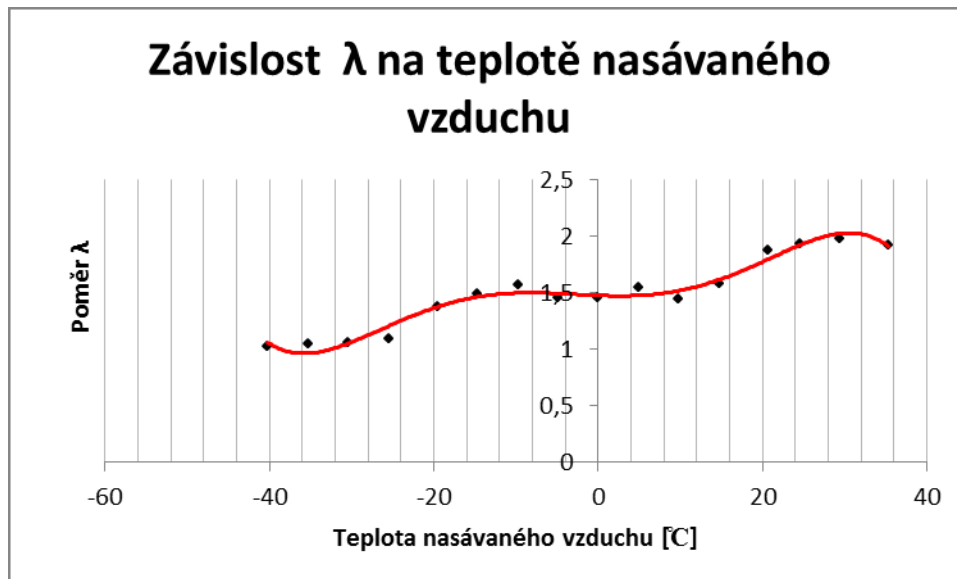
Pro nastavení těchto podmínek byly snímače teplot nahrazeny proměnnými rezistory takových hodnot, aby bylo možné nastavit dané hodnoty teplot.

Stejným způsobem jako u prvního měření byly dopočítány hodnoty stechiometrických poměrů a součinitelů přebytků vzduchu λ .

Výsledné naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce číslo 4.

Teplota nasávaného vzduchu [°C]	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mm ³]	Stechiometrický poměr	λ
-40,2	328,1	25,7	14,84	1,02
-35,3	304	23,2	15,23	1,05
-30,4	295,5	22,4	15,34	1,06
-25,5	308,3	22,7	15,79	1,09
-19,6	359,7	20,8	20,1	1,38
-14,7	346,9	19,2	21,09	1,49
-9,8	424	21,6	22,83	1,57
-4,9	372,6	22,7	19,07	1,31
0	411,1	22,7	21,06	1,45
4,9	436,8	22,7	22,37	1,54
9,8	359,7	20	20,91	1,44
14,7	449,6	22,7	23,03	1,58
20,6	529,5	22,7	27,12	1,87
24,5	498,5	20,7	28,01	1,93
29,4	506,4	21,4	28,69	1,98
35,3	529,6	22,1	27,39	1,92

Tabulka č.4: Vliv teploty nasávaného vzduchu



Graf č 2: Závislost λ na teplotě nasávaného vzduchu

Z měření je patrné, že při tvorbě směsi při fázi startu motoru má teplota nasávaného vzduchu menší váhu než teplota chladicí kapaliny. Logicky, by se tyto dvě proměnné měly

vzájemně ovlivňovat. Avšak množství vzduchu přiváděné do válce motoru je relativně malé a rychle přijme teplotu okolí, ve kterém se právě nachází. Teplotu okolí vytváří teplota chladicí kapaliny, a proto ovlivnění součinitele λ teplotou nasávaného vzduchu není tak markantní, jako u teploty chladicí kapaliny.

Z grafu číslo 2. lze říci, že závislost teploty nasávaného vzduchu a λ je rozdělena na tři úseky. Pro nízké teploty od -40°C do -25°C je součinitel přebytku vzduchu λ udržován na hodnotě cca 1. Další úsek je definován teplotami od -25°C do 20°C . V tomto úseku udržuje řídicí jednotka součinitel λ na hodnotě 1,5. Poslední úsek je v rozmezí teplot od 20°C do 35°C , kde má součinitel přebytku vzduchu λ hodnotu 2.

Opět je pro nižší teplotu směs bohatší než pro vyšší teploty. Avšak její ovlivňování teplotou nasávaného vzduchu není tak velké v porovnání s teplotou chladicí kapaliny.

6.3 Analýza vlivu teploty paliva na tvorbu směsi

Další proměnná pro určení tvorby směsi při fázi startování motoru je teplota paliva. Palivo přicházející do válce motoru sebou nese určitou teplotu a tím ovlivňuje teplotu celé směsi před zápal. Teplota paliva je měřena pomocí NTC snímače teploty. Tento snímač je umístěn na konci nízkotlaké části u systému Common rail. Je tedy umístěn těsně před vysokotlakým čerpadlem, aby určení teploty paliva bylo co nejpřesnější.

Toto měření mělo určit jakou mírou ovlivňuje teplota paliva tvorbu směsi při fázi startování motoru. Měření proběhlo na automobilu Hyundai i30 1.6 CRDi r.v. 03/2012 označení motoru D4FB.

Předpokladem pro měření na vozidle bylo uvést vozidlo do měřicích podmínek:

- teplota chladicí kapaliny cca 90°C ,
- teplota nasávaného vzduchu 19°C ,
- nastavení teploty paliva v rozmezí $-27,5^{\circ}\text{C}$ až 60°C

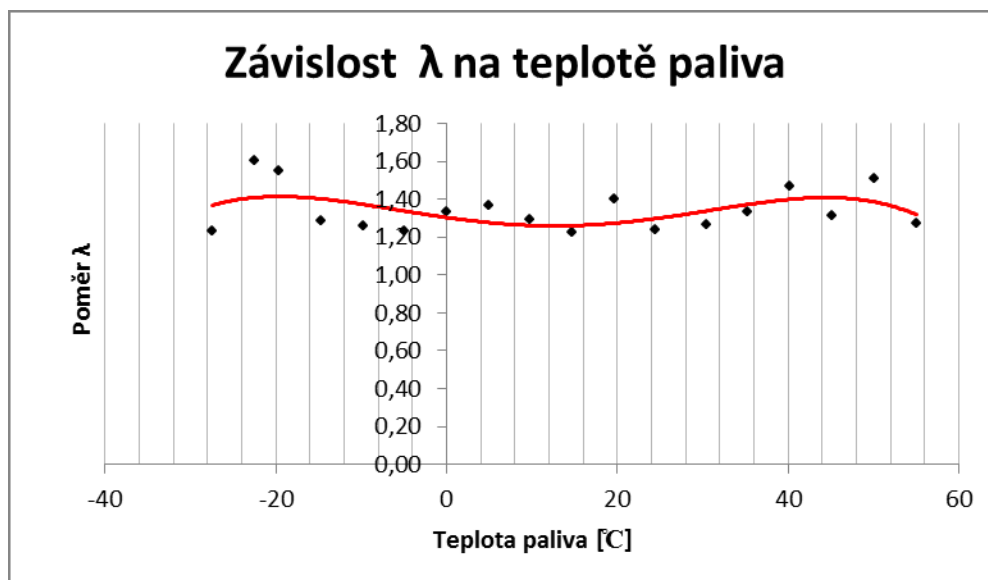
Pro nastavení měřicích podmínek byly použity potenciometry, pomocí kterých byly nastaveny požadované teploty.

Měření a vypočítání hodnot probíhalo stejným způsobem jako u prvního měření startovací dávky při různé teplotě chladící kapaliny.

Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce číslo 5.

Teplota paliva [°C]	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mg]	Stechiometrický poměr	λ
-27,5	398,3	25,88	17,90	1,23
-22,5	439,6	22	23,23	1,60
-19,6	438,2	22,7	22,45	1,55
-14,7	295,85	18,4	18,70	1,29
-9,8	308,3	19,6	18,29	1,26
-4,9	441,9	28,7	17,90	1,23
0	351,1	21,1	19,35	1,33
4,9	321,2	18,8	19,87	1,37
9,8	365,3	22,7	18,71	1,29
14,7	347,9	22,7	17,82	1,23
19,6	396,9	22,7	20,33	1,40
24,5	334	21,6	17,98	1,24
30,4	321,4	20,4	18,32	1,26
35,3	346,9	20,8	19,39	1,34
40,2	359,7	19,6	21,34	1,47
45,1	372,6	22,7	19,09	1,32
50,1	426,7	22,7	21,86	1,51
55,1	359,7	22,7	18,43	1,27
nelze	nelze	nelze	-	-

Tabulka č.5: Měření vlivu teploty paliva



Graf č.3: Vliv teploty paliva

Z grafu číslo 3, který je výsledkem měření, lze pozorovat, že teplota paliva nemá příliš velký vliv na určení startovací dávky. Při teplotě $-27,5^{\circ}\text{C}$ byl součinitel přebytku vzduchu λ na hodnotě 1,23. Tato hodnota je v dalším průběhu korigována pouze v malém rozmezí (0,37). Z grafu je tedy patrné, že řídicí jednotka udržuje při různých teplotách paliva konstantní součinitel λ . Jako poslední informace z měření lze uvést, že po překročení teploty paliva $55,1^{\circ}\text{C}$ je řídicí jednotkou motoru vyhodnocena teplota paliva jako neadekvátní. Pro určení součinitele λ je počítáno s náhradní hodnotou teploty, která je 38°C . A proto nebylo možné v měření pokračovat.

6.4 Analýza současného vlivu všech teplot ovlivňující tvorbu směsi při startování

V tomto měření budou simulovány reálné podmínky, ve kterých se může motor během startování nacházet. Tedy teploty ovlivňující tvorbu směsi budou nastavovány v přibližně stejných hodnotách a rozdíl v nich bude minimální.

Úkolem tohoto měření bylo analyzovat směs při různých teplotních podmínkách. Měření proběhlo na stojícím automobilu Hyundai i30 1.6 CRDi r.v. 03/2012 označení motoru D4FB.

Předpokladem pro měření na vozidle bylo uvést vozidlo do měřicích podmínek:

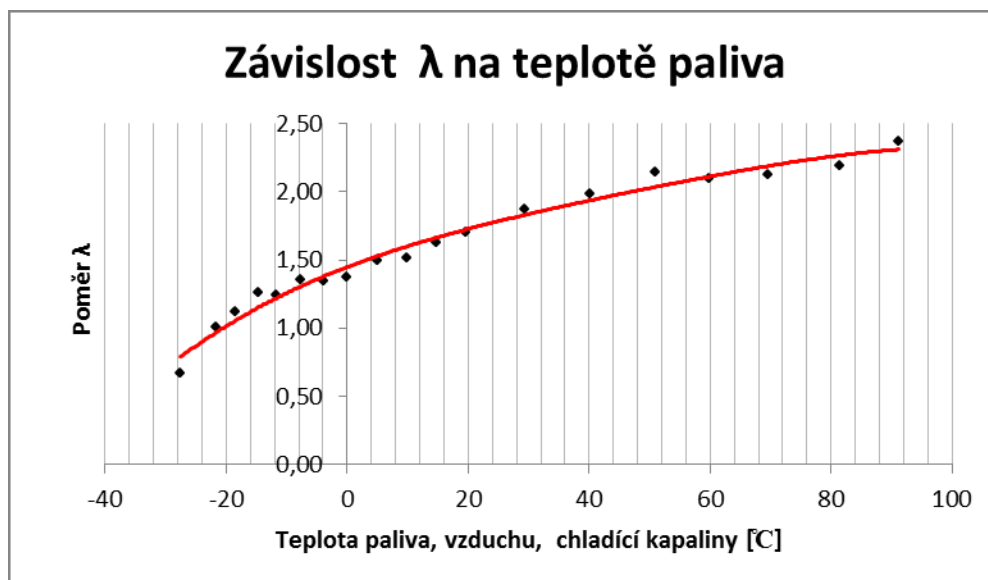
- teplota chladící kapaliny rozmezí $-27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- teplota paliva rozmezí $-27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $91,2\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- různé teploty nasávaného vzduchu v rozmezí $-27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Postup nastavení simulovaných teplot, měření výčtu a výpočtu skutečných hodnot probíhalo totožným způsobem jako v předchozích měřeních.

Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce číslo 6.

Teplota paliva[$^{\circ}\text{C}$]	Teplota vzduchu ve válci[$^{\circ}\text{C}$]	Teplota chladící kapaliny [$^{\circ}\text{C}$]	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mg]	Stechiometrický poměr	λ
-27,5	-27,5	-27,5	321,5	38,4	9,74	0,67
-21,6	-21,6	-21,6	482,2	38,4	14,60	1,01
-18,6	-18,6	-18,6	526,7	37,6	16,29	1,12
-14,7	-14,7	-14,7	572,6	36,5	18,24	1,26
-11,8	-11,8	-11,8	539,6	34,9	17,98	1,24
-7,8	-7,8	-7,8	572,6	33,9	19,64	1,35
-3,9	-3,9	-3,9	539,7	32,2	19,49	1,34
0	0	0	539,6	31,4	19,98	1,38
4,9	4,9	4,9	546,9	29,4	21,63	1,49
9,8	9,8	9,8	540,9	28,6	21,99	1,52
14,7	14,7	14,7	549,6	27,1	23,58	1,63
19,6	19,6	19,6	524	24,7	24,67	1,70
29,4	29,4	24,4	539,7	23,1	27,17	1,87
40,2	40,2	40,2	534,1	21,6	28,75	1,98
51	51	52	608	22,7	31,14	2,15
59,8	59,8	59,8	585,4	22,4	30,39	2,10
69,6	70,6	69,6	594,7	22,4	30,87	2,13
81,4	81,4	80,4	611,8	22,4	31,76	2,19
91,2	92,2	89,2	641,2	21,7	34,36	2,37

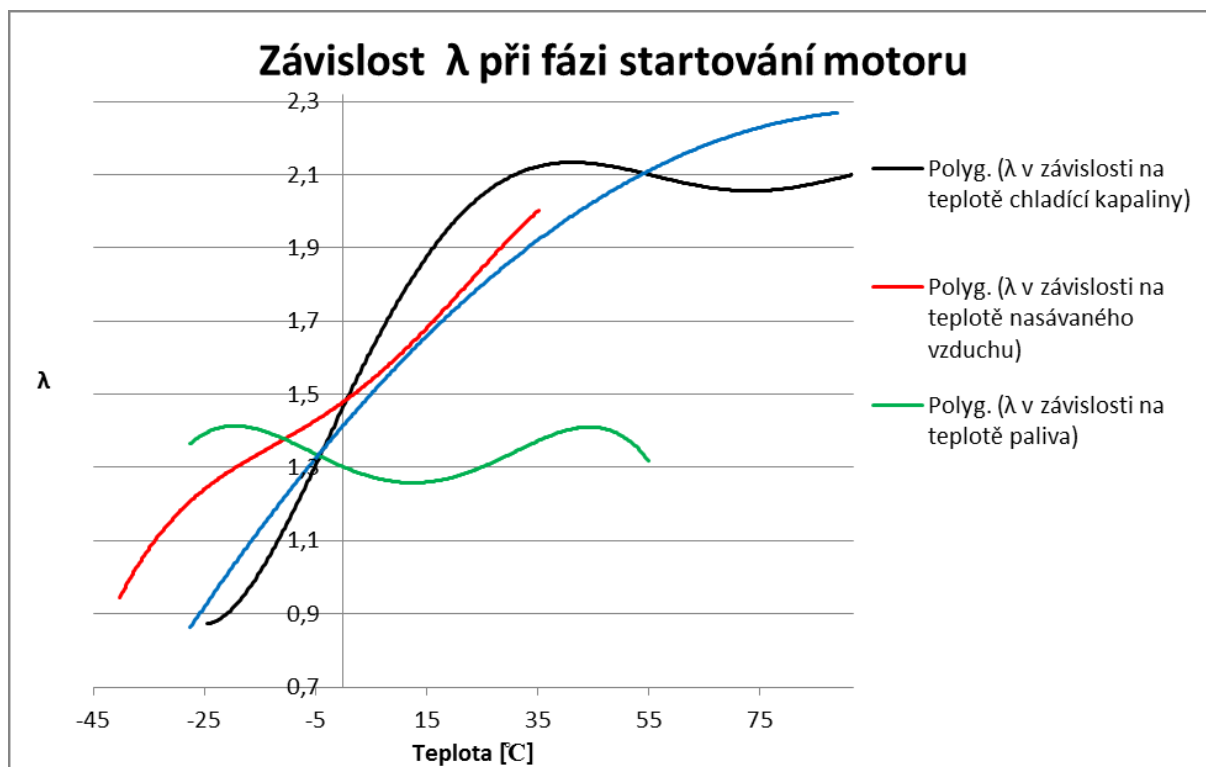
Tabulka č.6: Měření vlivu všech teplot



Graf č.4: Analýza směsi při reálných podmínkách

Měření opět dokazuje již dříve zmíněnou skutečnost, že se zvyšující teplotou směsi se musí směs ve fázi startování motoru ochuzovat. Míra a velikost ochuzení je přímo úměrná počtu a velikosti proměnných, které ji ovlivňují. Například při měření směsi bez vlivu teploty paliva (měření číslo 1.) se součinitel přebytku vzduchu λ pohyboval v rozmezí 0,86 až 2,223. Ale při uvažování teploty paliva se hodnoty λ pohybovaly ve větším rozmezí a to 0,67 až 2,37. Z toho plyne, že každá teplota má svůj určitý procentuální význam při tvorbě startovací dávky, a že při poruše jednoho se snímačů není směs tvořena ideálně.

6.5 Vliv jednotlivých teplot na tvorbu směsi při fázi startování motoru



Graf č.5: Závislost λ na různých proměnných teplot

Ovlivňující proměnná	Naměřené rozmezí λ	Hodnota rozdílu
Teplota nasávaného vzduchu+ tepl. chladící kap. + tepl.paliva	0,67	1,7
Teplota nasávaného vzduchu + teplota chladící kapaliny	0,86-2,223	1,363
Teplota nasávaného vzduchu	1,02-1,92	0,9
Teplota paliva	1,6-1,23	0,37

Tabulka č.7: Vliv různých proměnných na tvorbu směsi při startu motoru

Výše uvedený graf číslo 5. a tabulka číslo 7. názorně ukazují jakou váhu mají jednotlivé teploty při určování ideálního stechiometrického poměru pro start motoru.

6.6 Analýza směsi ve fázi zahřívání motoru

Další fází, která probíhá po startu motoru je fáze zahřívání motoru. Tato fáze je specifická tím, že motor není zahřátý na provozní teplotu. Snahou je, aby byla tato fáze co nejkratší a tím se minimalizovalo opotřebení motoru, které je větší, když není motor zahřátý na provozní teplotu. Během fáze zahřívání motoru má na tvorbu směsi největší podíl teplota chladicí kapaliny. Směs zde není upravována pomocí hodnot z lambda sondy ani s vlivem na co nejmenší spotřebu paliva

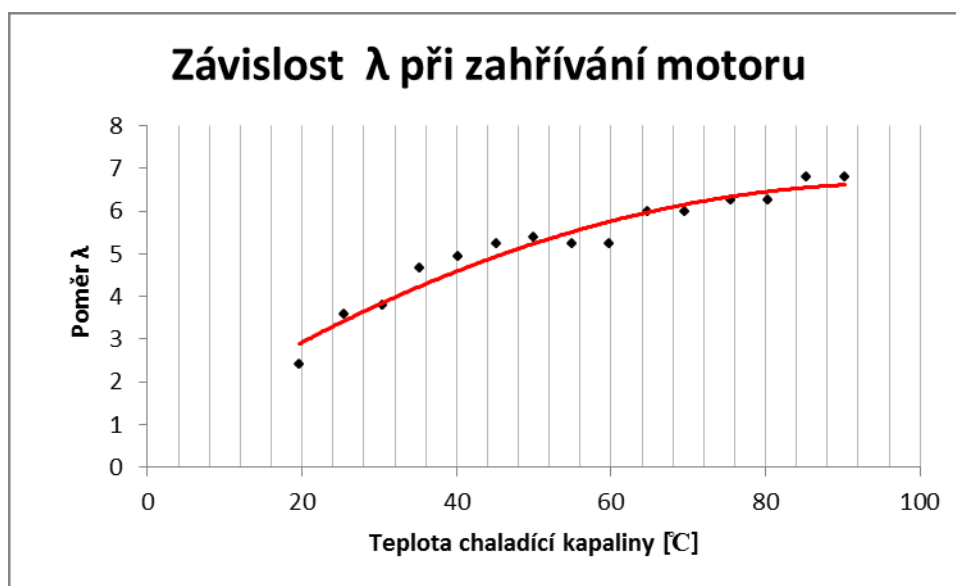
Toto měření mělo za cíl analyzovat tvorbu směsi během zahřívání motoru. Měření bylo provedeno na vozidle Hyundai i30 1.6 CRDi r.v. 03/2012 označení motoru D4FB. Vozidlo bylo nastartováno a ponecháno ve volnoběžných otáčkách 1000 ot/min. Hodnoty potřebné pro určení součinitele přebytku vzduchu λ byly odečítány po 5 °C.



Obrázek č.6: Skutečné hodnoty během fáze zahřívání motoru

Teplota chladicí kapaliny [°C]	Teplota nasávaného vzduchu	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mm ³]	Stechiometrický poměr	λ
19,6	11,8	424	14,1	34,97	2,41
25,5	12,7	436,8	9,8	51,83	3,57
30,4	12,7	424	9	54,78	3,78
34,3	13,7	436,8	7,5	67,72	4,67
40,2	14,7	436,8	7,1	71,54	4,93
45,1	15,7	436,8	6,7	75,81	5,23
50	16,7	424	6,3	78,26	5,40
54,9	20,6	411,1	6,3	75,88	5,23
59,8	21,6	411,1	6,3	75,88	5,23
64,7	21,6	411,1	5,5	86,91	5,99
69,6	23,5	411,1	5,5	86,91	5,99
75,5	26,5	398,3	5,1	90,81	6,26
80,4	28,4	398,3	5,1	90,81	6,26
85,3	31,4	398,3	4,7	98,54	6,80
90,2	31,4	398,3	4,7	98,54	6,80

Tabulka č.8 Naměřené a vypočítané hodnoty při fázi zahřívání motoru



Graf č.6: Fáze zahřívání motoru

Výsledek měření je graf číslo 6. Zde je vidět, že směs je se vzrůstající teplotou chladicí kapaliny ochuzována. Rozmezí součinitele λ je poměrně velké od hodnoty 2,41 až

do hodnoty 6,8. Z těchto hodnot lze také usuzovat, že spotřeba paliva se během zahřívání velice mění, i když je motor bez zatížení a ve volnoběžných otáčkách.

Dále bylo změřeno, že tato fáze trvala bez přidání plynu 3120 s tedy cca 52 minut.

6.7 Analýza směsi ve fázi práce v uzavřené smyčce přepřlňovaného motoru

Fáze práce motoru v uzavřené smyčce je fází, ve které se motor nachází nejčastěji. Do této fáze se motor dostává po zahřátí všech komponentů na provozní teplotu. Tím se myslí ne pouze zahřátí motoru na cca 90 °C, ale také například lambda sondy. Směs se nevypočítává pouze pomocí lookup tabulek, ale také pomocí kontrolních zpětnovazebních prvků (snímače otáček, lambda sondy).

Druhá část měření byla zaměřena na změření regulace tvorby směsi. Jelikož je motor analyzovaného vozidla dieselový a vybavený turbodmychadlem, jedná se tedy o měření smíšené regulace tvorby směsi. Při smíšené regulaci se na rozdíl od kvalitativní regulace reguluje nejen vstřikovací dávka při téměř konstantním přísunu vzduchu, ale mění se i množství vzduchu dodané do válce motoru pomocí turbodmychadla.

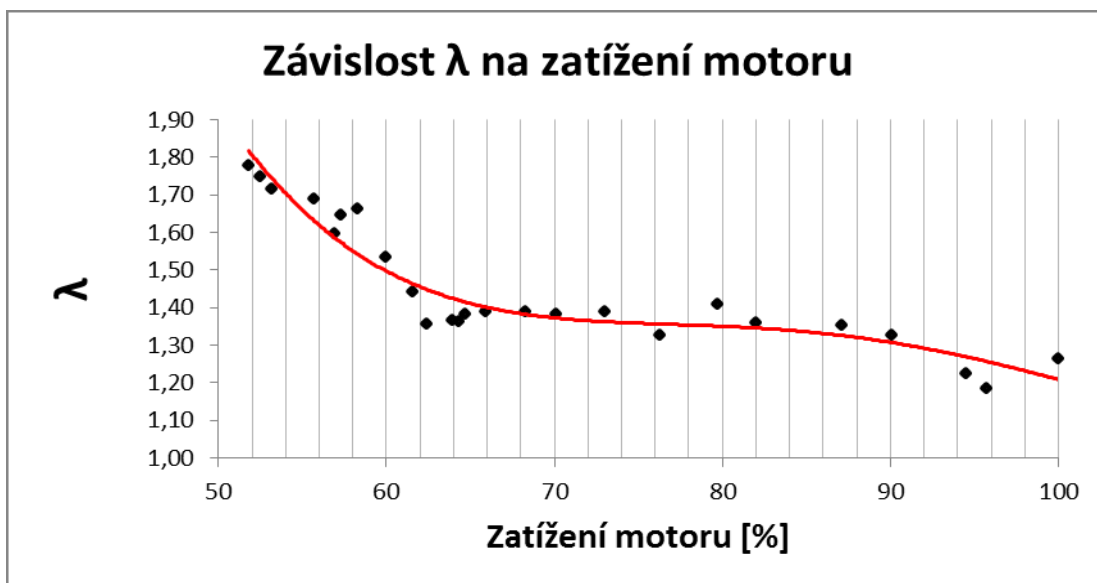
Měření této fáze chodu motoru probíhalo na zahřátém na vozidle Hyundai i30 1.6 CRDi r.v. 03/2012 označení motoru D4FB. Vozidlo bylo upevněno na motorovou brzdou, aby bylo možné simulovat zatížení motoru. Na motorové brzdě byl zvolen program měření při konstantní rychlosti vozidla. To znamená, že vozidlo zrychlovalo do předem nastavené rychlosti (v tomto případě 30 km/hod.). Po dosažení rychlosti se zvyšovalo zatížení motoru. To také umožnilo změřit druhou fázi měření a to smíšenou regulaci tvorby směsi. Odečtení a výpočet potřebných hodnot probíhalo totožným způsobem jako u předchozích měření.



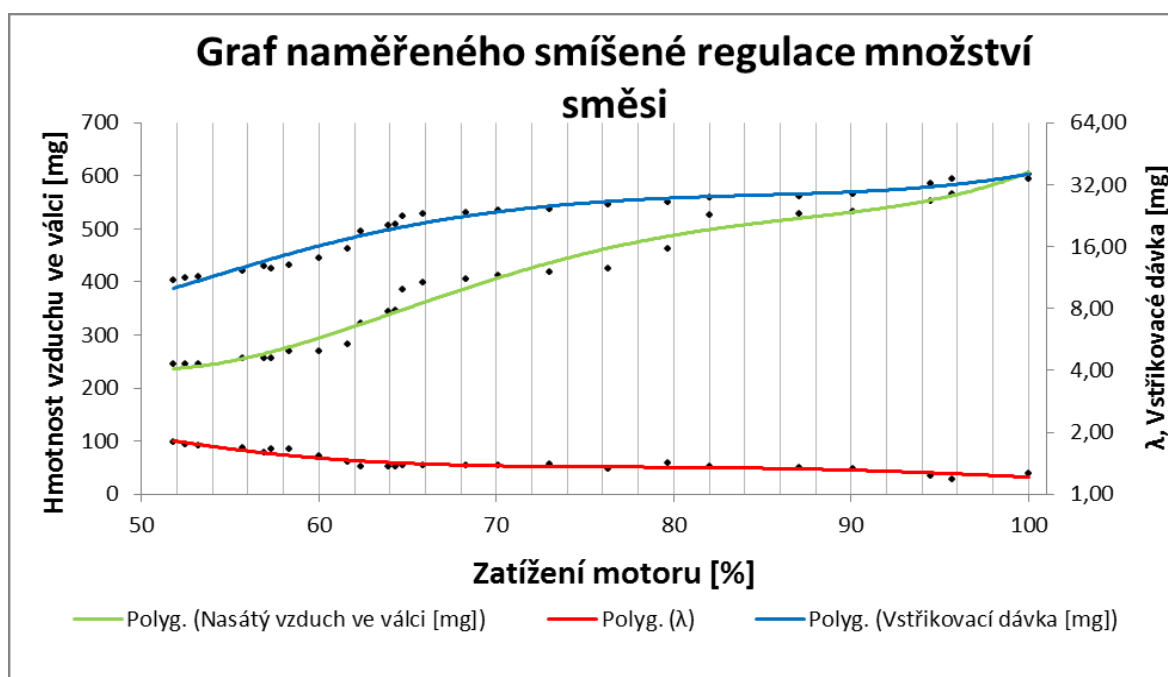
Obrázek č.7: Měření směsi v zatížení

Zatížení motoru[%]	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mg]	Stechiometrický poměr	λ
51,8	244,1	11	25,80	1,78
52,5	244,1	11,2	25,34	1,75
55,7	256,9	12,2	24,49	1,69
56,9	256,9	12,9	23,16	1,60
57,3	256,9	12,5	23,90	1,65
58,3	269,8	13	24,13	1,66
60	269,8	14,1	22,25	1,53
61,6	282,6	15,7	20,93	1,44
63,9	343,9	20,2	19,80	1,37
65,9	398,3	23	20,14	1,39
68,3	405,1	23,4	20,13	1,39
70,1	412,1	23,9	20,05	1,38
73	419,3	24,2	20,15	1,39
76,3	424	25,6	19,26	1,33
79,7	462,5	26,3	20,45	1,41
82	526,7	27,8	19,74	1,36
87,1	529,1	28,1	19,61	1,35
90,1	533,2	28,9	19,22	1,33
94,5	552,4	32,4	17,76	1,22
95,7	565,3	34,3	17,17	1,18
100	603,8	34,3	18,34	1,26

Tabulka č.8: Naměřené a vypočítané hodnoty při zatížení motoru



Graf č.7: Závislost λ při změně zatížení motoru



Graf č.8: Naměřená smíšená regulace

Při zvýšení zatížení dochází k prudkému obohacení směsi. To je způsobeno tím, že pro udržení motoru v konstantních otáčkách při zvyšování zátěže je nutné zvýšit vstřikovací dávku paliva. Právě zvýšením vstřikovací dávky se směs obohacuje. Protože je motor vybaven turbodmychadlem mění se se zvyšujícím zatížením také množství vzduchu přivedené do válce. I když je vzduch přivedený do válce závislý na otáčkách

turbodmychadla, může jej řídicí jednotka upravovat pomocí obtokového ventilu Wastegate. Tím lze vstřikovací dávce mírně upravit i množství vzduchu. Tato závislost je patrná z grafu číslo 8, kde mají křivky vstřikovaného paliva a množství nasávaného vzduchu podobný tvar. Dále lze z proběhlého měření říci, že analyzovaný motor pracuje při zatížení s hodnotou λ od 4,61 do 1,38. Směs je tedy permanentně chudá.

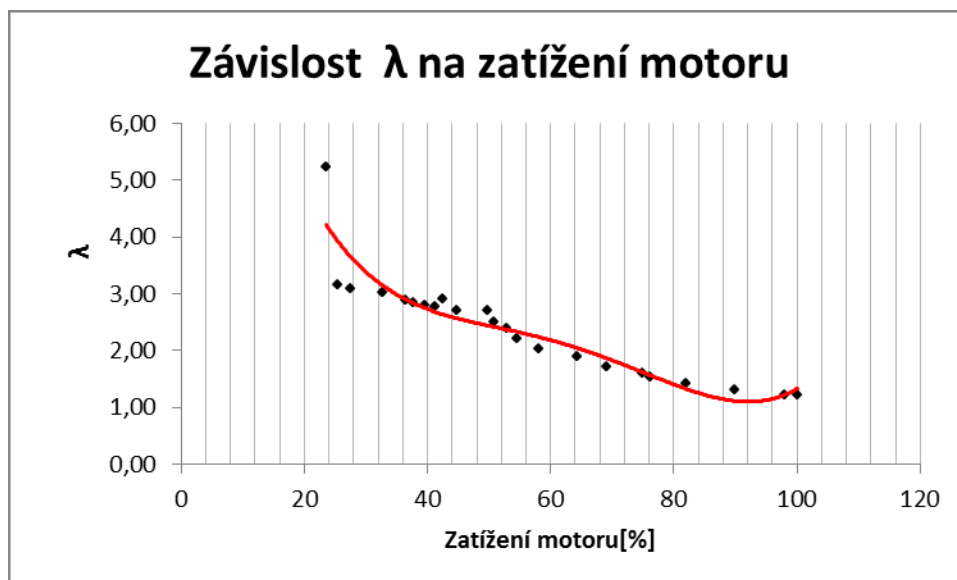
6.8 Analýza směsi ve fázi práce v otevřené smyčce nepřepřehňovaného motoru

Protože starší dieselové motory nebývaly vybaveny turbodmychadly nebo kompresory, bude následující měření zaměřeno na analýzu směsi při odpojení turbodmychadla. To bude mít za důsledek, že regulace tvorby směsi se změní ze smíšené na kvalitativní. Při kvalitativní regulaci se řídí výkon a kroutící moment motoru pouze pomocí změny vstřikovací dávky.

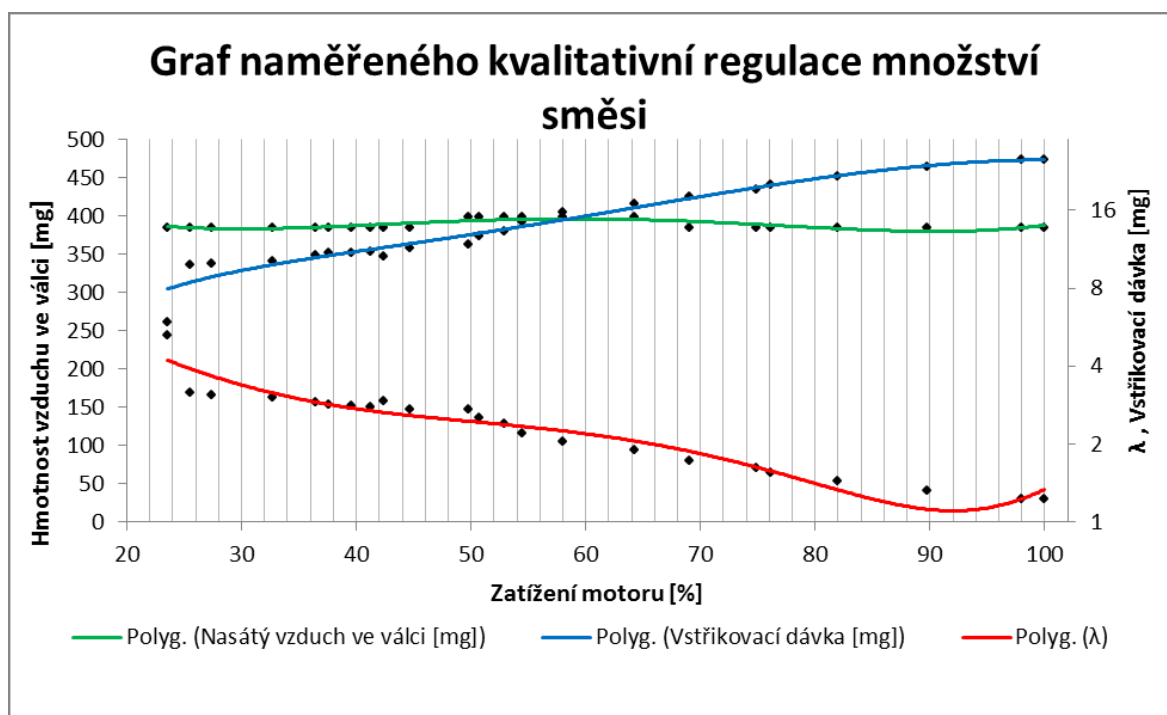
Měření proběhlo totožným způsobem jako minulé měření. Jediným rozdílem bylo to, že vozidlo nebylo přepřehňováno. Toho se dosáhlo odpojením přívodní hadice do mezichladiče vzduchu. Tedy vzduch přiváděný od turbodmychadla se nedostával do motoru. Motor pracoval pouze se vzduchem, který si sám nasál podtlakem. Jelikož se snímač tlaku nacházel za mezichladičem vzduchu, byla jeho hodnota tlaku věrohodný údaj, který se mohl použít pro výpočet součinitele přebytku vzduchu.

Zatížení motoru[%]	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mg]	Stechiometrický poměr	λ
23,5	385,4	5,9	75,96	5,24
25,5	385,4	9,8	45,73	3,15
27,4	385,4	10	44,81	3,09
32,7	385,4	10,2	43,94	3,03
36,5	385,4	10,7	41,88	2,89
37,6	385,4	10,9	41,11	2,84
39,6	385,4	11	40,74	2,81
41,2	385,4	11,1	40,37	2,78
42,4	385,4	10,6	42,28	2,92
44,7	385,4	11,4	39,31	2,71
49,8	398,3	11,8	39,25	2,71
50,7	398,3	12,7	36,47	2,52
52,9	398,3	13,3	34,82	2,40
54,5	398,3	14,5	31,94	2,20
58	398,3	15,7	29,50	2,03
64,3	398,3	16,9	27,40	1,89
69	385,4	18	24,90	1,72
74,9	385,4	19,2	23,34	1,61
76,1	385,4	20	22,41	1,55
82	385,4	21,6	20,75	1,43
89,8	385,4	23,5	19,07	1,32
98	385,4	25,1	17,85	1,23
100	385,4	25,1	17,85	1,23

Tabulka č.9: Naměřené a vypočítané hodnoty při zatížení motoru



Graf č.9: Závislost λ při změně zatížení motoru



Graf č.10: Naměřená kvalitativní regulace

Se zvyšujícím zatížením se směs opět obohacovala. Jak lze ale vidět z průběhů grafu číslo 10. nedocházelo ke změně množství vzduchu, které bylo přiváděno do válce. Výkon a kroutící moment se tedy regulovaly pouze změnou vstřikovací dávky. Dále se také výrazněji měnil součinitel přebytku vzduchu λ oproti motoru přepřehovaném.

Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot pro oba typy regulace tvorby směsi je uvedeno v tabulce číslo.10. Hodnoty uvedené v zeleném poli jsou hodnoty rozdílu maximální a minimální hodnoty dané proměnné.

	Motor s turbodmychadlem	Motor bez turbodmychadla
Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	372,6	12,9
Vstřikovací dávka [mg]	26,6	19,2
Součinitel přebytku vzduchu [mg]	3,16	4,01

Tabulka č.10: porovnání rozdílu hodnot obou měření

6.9 Analýza hodnot lambda :

Tvorba směsi je při práci motoru v režimu uzavřené smyčky ovlivňována měřením součinitele přebytku vzduchu pomocí širokopásmové lambda sondy umístěné ve výfukovém potrubí. Lambda sonda měří aktuální hodnotu λ^* , a přeposílá napěťový signál do řídicí jednotky motoru, která této hodnotě napětí přes lookup tabulku přidělí patřičnou aktuální hodnotu λ^* . Podle hodnoty λ^* se dále koriguje směs pro další pracovní cyklus motoru. Výstupní hodnota λ^* z lambda sondy není vždy shodná s hodnotou λ vstupní. Důvodem tohoto rozdílu je ne vždy stejné prohoření směsi nebo neadekvátní doba vstřiku (v důsledku poklesu palubního napětí) atd. Toto měření má za cíl analyzovat rozdíl těchto hodnot a určit, které více odpovídá skutečné hodnotě λ_s . Dále se zde bude měřit hodnota λ_m , která je přímo generovaná řídicí jednotkou. Tato hodnota bude odečtena pomocí sériové diagnostiky.

Měření proběhlo na vozidle Hyundai i30 1.6 CRDi r.v. 03/2012 označení motoru D4FB. Motor byl zahřán na provozní teplotu. Protože bylo nutné analyzovat hodnoty λ v co největším rozmezí, měření proběhlo v zatížení a proto bylo vozidlo umístěno na válcovou výkonovou zkušebnu.

Hodnota vstupní λ byla vypočtena stejným způsobem jako v předchozích měřeních. Hodnota λ^* byla určena pomocí naměřeného výstupního napětí z lambda sondy. Jelikož byla níže uvedená převodní charakteristika v závislosti na čerpacím proudu, byl nutný přepočít na tento proud I_p . Tento přepočít vyžadoval znát hodnotu měřicího rezistorů R_m , která byla změřena pomocí ohmmetru.

Příklad výpočtu pro hodnotu napětí 470,6 mV.

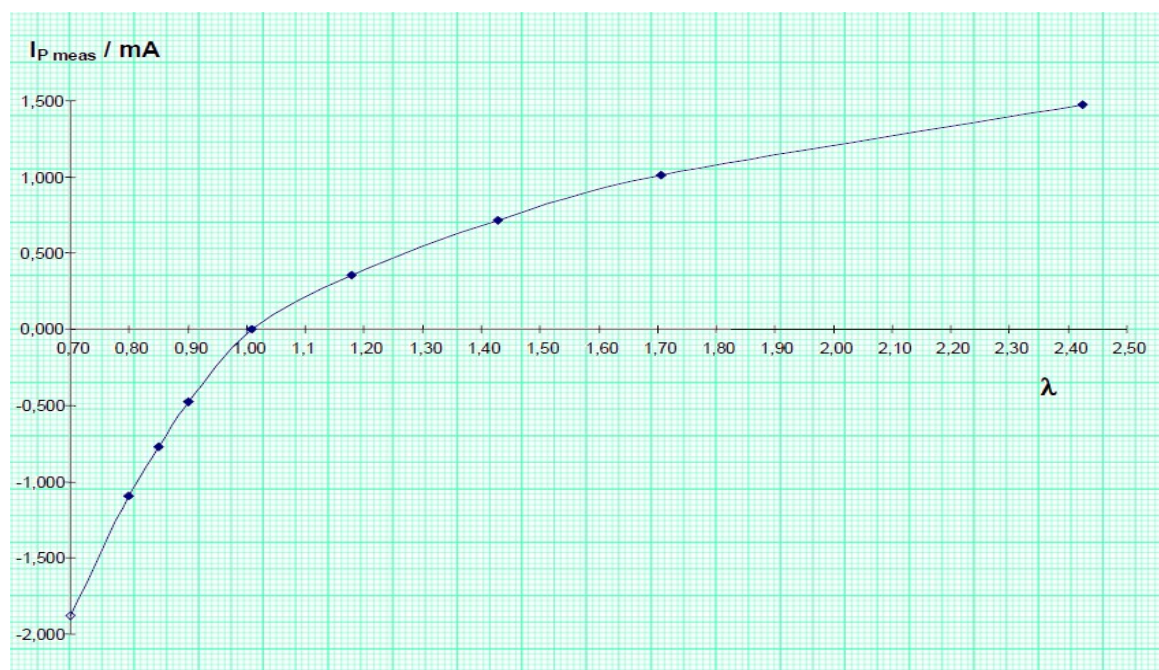
$$I_p = \frac{U_v}{R_m} = \frac{470,6}{384} = 1,23 \text{ mA} \quad (6.3)$$

LEGENDA

I_p čerpací proud [mA]

U_v měřené výstupní napětí z lambda sondy [mV]

R_m odpor měřicích rezistorů [384 mΩ]

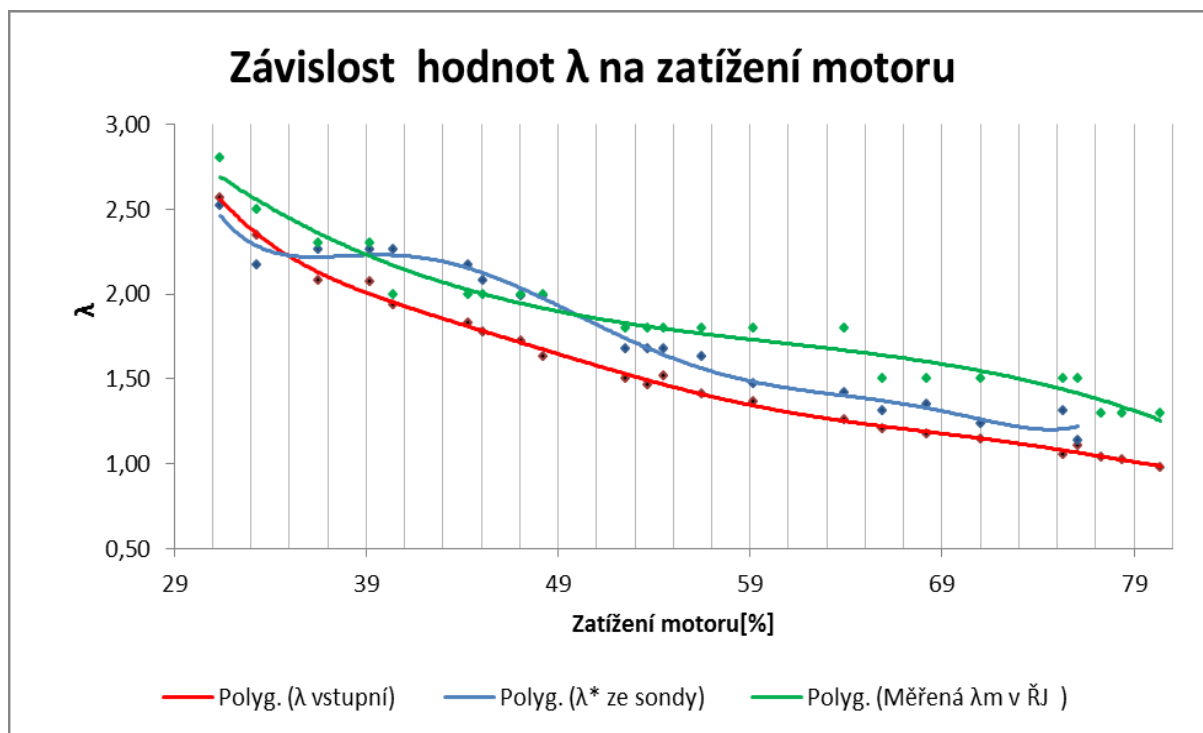


Obr.č.8: Převodní charakteristika lambda sondy

Hodnotě čerpacího proudu 1,23 mA odpovídá hodnota $\lambda^* = 2,17$.

Zatížení motoru [%]	Hmotnost vzduchu ve válci [mg]	Vstřikovací dávka [mg]	Napětí λ [mV]	Měřený I ze sondy [mA]	λ^* ze sondy	Měřená λ_m v ŘJ	λ vstupní	Stechiometrický poměr
31,4	372,6	8,6	705,9	1,84	-	2,8	2,57	37,26
33,3	372,6	9,4	666,7	1,74	-	2,5	2,35	34,09
36,5	385,4	11	588,2	1,53	-	2,3	2,08	30,13
39,2	398,3	11,4	568,6	1,48	2,52	2,3	2,07	30,05
40,4	398,3	12,2	470,6	1,23	2,17	2	1,94	28,08
44,3	398,3	12,9	490,2	1,28	2,26	2	1,83	26,55
45,1	398,3	13,3	490,2	1,28	2,26	2	1,78	25,75
47,1	398,3	13,7	490,2	1,28	2,26	2	1,72	25,00
48,2	398,3	14,5	470,6	1,23	2,17	2	1,63	23,62
52,5	398,3	15,7	451	1,17	2,08	1,8	1,50	21,82
53,7	398,3	16,1	431,4	1,12	1,99	1,8	1,47	21,28
54,5	411,1	16,1	431,4	1,12	1,99	1,8	1,51	21,96
56,5	411,1	17,3	352,9	0,92	1,68	1,8	1,41	20,44
59,2	424	18,4	352,9	0,92	1,68	1,8	1,37	19,82
63,9	424	20	352,9	0,92	1,68	1,8	1,26	18,23
65,9	424	20,8	333,3	0,87	1,63	1,5	1,21	17,53
68,2	436,8	22	272,5	0,71	1,47	1,5	1,18	17,07
71	462,5	23,9	254,9	0,66	1,42	1,5	1,15	16,64
75,3	488,2	27,5	196,1	0,51	1,31	1,5	1,05	15,27
76,1	565,3	30,2	215,7	0,56	1,35	1,5	1,11	16,10
78,4	629,5	36,5	156,9	0,41	1,24	1,3	1,02	14,83
77,3	616,7	35,3	196,1	0,51	1,31	1,3	1,04	15,02
80,4	642,4	38,8	98	0,26	1,14	1,3	0,98	14,24

Tabulka č.10: Naměřené a vypočítané hodnoty λ



Graf č.11: Naměřené průběhy λ

Výsledné naměřené průběhy potvrzují, že jsou rozdíly mezi jednotlivými λ hodnotami. Nejméně přesnou hodnotou pro určení součinitele přebytku vzduchu je λ_m . λ_m se mění po hodnotě 0,2 v celém měřeném rozsahu, což ukazuje, že je tato hodnota nejméně přesná a slouží pouze jako orientační. Přesnější hodnota je λ vstupní. Její průběh je ale lineární, což ukazuje na jistou nepřesnost. Další nepřesnost je způsobena tím, že je tato hodnota vypočítána ze vstupních hodnot, a proto nedává relevantní údaj o tom, co se v motoru skutečně děje. Nejpresnější hodnota je λ^* měřená lambda sondou. Hlavní důvod je, že je měřena až po procesu hoření. Tím dává reálný údaj co se se směsí dělo v motoru a jaké bylo její složení. Na jejím nelineárním průběhu lze vidět, že se měří skutečně aktuální hodnota součinitele přebytku vzduchu λ_s .

7 Závěr

Vypracováním této bakalářské práce jsem získal velice detailní znalosti a informace o řízení moderních vznětových motorů. Během zpracování práce jsem pochopil všechny fyzikální jevy a děje, které v motoru probíhají. V práci jsem se podrobně zabýval výpočty a procesy pro určení směsi ve všech jízdních režimech motoru. Jelikož se jednalo o detailní analýzu, byly zde rozpracovány procesy pro určení a řízení tvorby směsi ve všech fázích, od fáze startování motoru až po fázi práce v uzavřené smyčce. Pro pochopení některých informací jsem navrhl a zpracoval bloková schémata týkající se dané problematiky, která přispívají k přehlednosti a srozumitelnosti práce. Druhá část práce je věnována měření. Měření jsem navrhl a realizoval tak, aby ověřovaly teoretické informace uvedené v první části práce. Během měření jsem aktivně zasáhl do některých komponentů automobilu (snímačů) za účelem dosažení měřicích podmínek. Tímto zásahem jsem získal kvalitní a přesné výsledky měření. Některá měření nepotvrzují pouze teoretické, již publikované znalosti, ale získávají také nové informace, které patří ke „know how“ daného výrobce automobilu. Měření výrazně přispívá ke zkvalitnění celé práce.

Měřením jsem se naučil prakticky aplikovat nabyté znalosti o moderních vznětových motorech.

Petr Belobrad

8 Literatura

- [1] RIBBENS, B.,W.: *Understanding Automotive Electronics*, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 s., ISBN 0-7506-7599-3
- [2] DENTON, Tom.: *Advanced automotive fault diagnosis*, 2nd ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006, xvi, 271 s., ISBN 978-0-75-066991-7
- [3] BOSCH *technické brožury, žluté sešity* 1996-2013
- [4] VLK, František.: *Elektronické systémy motorových vozidel*, 1. vyd. Brno: Prof. Ing. František Vlk, 2002, 298 s., ISBN 80-238-7282-6.
- [5] RŮŽIČKA, Bronislav.: *Jak na chiptuning*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2008, 184 s. ISBN 978-80-251-2096-5.
- [6] PAVLŮSEK, Ondřej. Český trh v roce 2010: Benzin vs. nafta u jednotlivých značek. [online]. [2014-01-08]. <http://www.auto.cz/cesky-trh-v-roce-2010-benzin-vs-nafta-u-jednotlivych-znacek-54218>
- [7] Teorie spalovacích motorů. VUT prezentace [online]. Brno [2013-11-06]. http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/html/motory_a_pohony/pohony_a_motory/prednasky/prezentace/4-2-tvorba_smesi.pdf

9 Seznam příloh

A. Typizovaná laboratorní úloha